

# МОДЕЛЬ АНДЕРСОНА ДЛЯ ОПИСАНИЯ МАГНИТНЫХ ПРИМЕСЕЙ В МЕТАЛЛЕ

---

ПОДГОТОВИЛ: БИКМУРЗИН М.А.

ГРУППА: ФТ-450005

# КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

---

- Примесь 0.1% и менее вызывает возникновение в металле необычных физических явлений (эффект Кондо и др.)
- Причина - влияние, оказываемое на электронный спектр атомами примеси с незамкнутыми внешними d- и f-оболочками
- При помещении атома примеси в кристаллическую решетку дискретные атомные уровни превращаются в электронные подзоны, ширина которых, значительно меньше, чем ширина s- и p- зон электронов проводимости

# ОБОБЩЕННОЕ РЕШЕНИЕ

---

Из первых принципов можем построить гамильтониан (N электронов в присутствии уединенной примеси)

$$\hat{H} = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\mathbf{p}_i^2}{2m} + U(\mathbf{r}_i) + V_{\text{imp}}(\mathbf{r}_i) \right) + \frac{1}{2} \sum_{i \neq j}^N \frac{e^2}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|} + \sum_{i=1}^N \lambda(\mathbf{r}_i) \mathbf{l}_i \cdot \boldsymbol{\sigma}_i$$

$V_{\text{imp}}$  - дополнительный потенциал, связанный с заменой одного из ядер  
3-е слагаемое - спин-орбитальное взаимодействие

Для решения подобных задач подходит метод DFT при условии, что магнитный момент скомпенсирован и плотность электронов однородна

# ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ АНДЕРСОНА ПЕРВЫЙ ШАГ

---

Рассмотрим металл, зона проводимости которого образована электронами из S-атомных состояний:

- 1) Электроны - квазичастицы движущиеся в периодическом потенциале
- 2) Кулоновский потенциал экранируется
- 3) Пренебрегаем взаимодействием на малых расстояниях (зона широкая, состояния делокализованы)

Получаем:

$$\hat{H}_0 = \sum_{\mathbf{k}, \sigma} \varepsilon(\mathbf{k}) \hat{c}_{\mathbf{k}, \sigma}^\dagger \hat{c}_{\mathbf{k}, \sigma}$$

Затравочный закон  $E(\mathbf{k})$  дисперсии определяется структурой решетки

# ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ АНДЕРСОНА ДОБАВЛЕНИЕ ПРИМЕСНОГО ИОНА

---

Взаимодействие электронов с примесью учтем через функции Ванье

$V_{\mathbf{k}}$  - матричный элемент гибридизации

В данном случае  $\mathbf{R}$  - любой вектор решетки,  $\mathbf{k}$  - квазимпульс электронов

$$\phi_{\mathbf{R}}(\mathbf{r}) = \frac{1}{\sqrt{N_a}} \sum_{\mathbf{k}} e^{-i\mathbf{k}\cdot\mathbf{R}} \psi_{\mathbf{k}}(\mathbf{r})$$

$N_a$  - число ячеек Вигнера-Зейца в кристалле,  $\psi$  - волна Блоха

$$V_{\mathbf{k}} = \sum_{\mathbf{R}} e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{R}} \langle \phi_d | \hat{H} | \phi_{\mathbf{R}} \rangle$$

$\phi_d$  - волновая функция d оболочки магнитного иона

# ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ АНДЕРСОНА МОДЕЛЬ БЕЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

---

Построенный на первых принципах гамильтониан без учета кулоновского взаимодействия, можно переписать

$$\hat{H} = \sum_{\sigma} \varepsilon_d \hat{c}_{d,\sigma}^{\dagger} \hat{c}_{d,\sigma} + \sum_{\mathbf{k},\sigma} \varepsilon(\mathbf{k}) \hat{c}_{\mathbf{k},\sigma}^{\dagger} \hat{c}_{\mathbf{k},\sigma} + \sum_{\mathbf{k},\sigma} (V_{\mathbf{k}} \hat{c}_{d,\sigma}^{\dagger} \hat{c}_{\mathbf{k},\sigma} + V_{\mathbf{k}}^* \hat{c}_{\mathbf{k},\sigma}^{\dagger} \hat{c}_{d,\sigma})$$

Модель Андерсона без взаимодействия

Для получения конечной модели нужно учесть кулоновский член на d орбитали

# ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ АНДЕРСОНА ФИНАЛЬНЫЙ ШАГ

---

Кулоновский интеграл:

$$U = \int \phi_d^*(\mathbf{r})\phi_d^*(\mathbf{r}') \frac{e^2}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} \phi_d(\mathbf{r})\phi_d(\mathbf{r}') d\mathbf{r}d\mathbf{r}'$$

Для атомных d орбиталей U принимает значения до 30 эВ, что существенно  
При помещении иона в решетку U уменьшается до 1-7 эВ

Итоговое выражение

$$\hat{H} = \sum_{\sigma} \varepsilon_d \hat{c}_{d,\sigma}^{\dagger} \hat{c}_{d,\sigma} + U \hat{n}_{d,\uparrow} \hat{n}_{d,\downarrow} + \sum_{\mathbf{k},\sigma} \varepsilon(\mathbf{k}) \hat{c}_{\mathbf{k},\sigma}^{\dagger} \hat{c}_{\mathbf{k},\sigma} + \sum_{\mathbf{k},\sigma} (V_{\mathbf{k}} \hat{c}_{d,\sigma}^{\dagger} \hat{c}_{\mathbf{k},\sigma} + V_{\mathbf{k}}^* \hat{c}_{\mathbf{k},\sigma}^{\dagger} \hat{c}_{d,\sigma})$$

1,3 члены - кинетические слагаемые; 2 - потенциальное; 4 - гибридизация

# ПАРАЛЛЕЛИ С МОДЕЛЬЮ ХАББАРДА

---

Общий вид модели Хаббарда

$$\hat{H} = -t \sum_{\langle i,j \rangle, \sigma} (\hat{c}_{i,\sigma}^\dagger \hat{c}_{j,\sigma} + \hat{c}_{j,\sigma}^\dagger \hat{c}_{i,\sigma}) + U \sum_{i=1}^N \hat{n}_{i\uparrow} \hat{n}_{i\downarrow}$$

Общий вид модели Андерсона

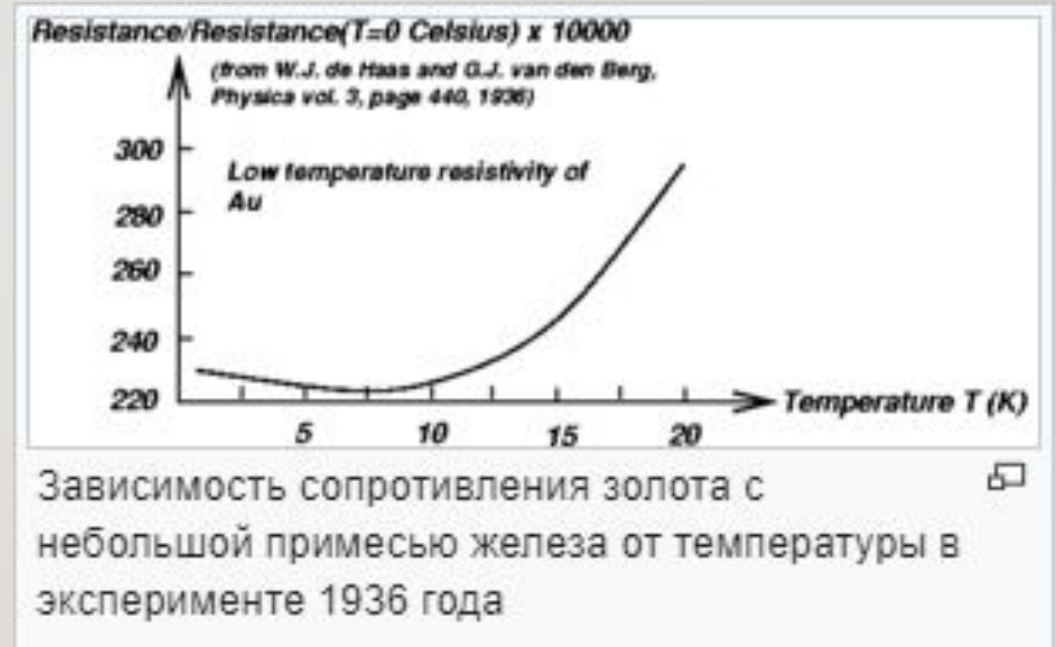
$$\hat{H} = \sum_{\sigma} \varepsilon_d \hat{c}_{d,\sigma}^\dagger \hat{c}_{d,\sigma} + U \hat{n}_{d,\uparrow} \hat{n}_{d,\downarrow} + \sum_{\mathbf{k}, \sigma} \varepsilon(\mathbf{k}) \hat{c}_{\mathbf{k},\sigma}^\dagger \hat{c}_{\mathbf{k},\sigma} + \sum_{\mathbf{k}, \sigma} (V_{\mathbf{k}} \hat{c}_{d,\sigma}^\dagger \hat{c}_{\mathbf{k},\sigma} + V_{\mathbf{k}}^* \hat{c}_{\mathbf{k},\sigma}^\dagger \hat{c}_{d,\sigma})$$

Если не учитывать кинетические члены, математически модели выглядят практически идентично, хоть и несут разный смысл



# ПРИМЕНЕНИЕ

- Модель Андерсона активно используется в теории сильных электронных корреляций как самостоятельная модель, так и как вспомогательное средство
- В частности модель применяется для изучения задачи Кондо
- Эффект Кондо - появление минимума в зависимости сопротивления примесных сплавов от температуры



# НЕСКОЛЬКО ПРОСТЫХ ПРЕДЕЛОВ

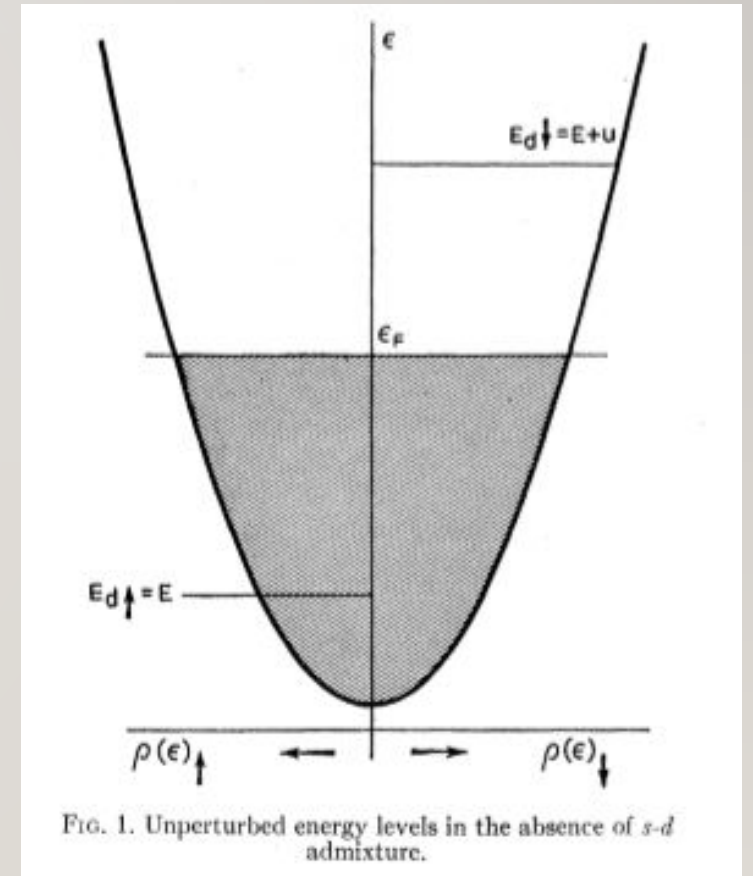
1)  $\epsilon_d \ll \epsilon_F, \epsilon_d + U \gg \epsilon_F$  - режим локализованного момента (кондовский предел)

$$\hat{H}_{s-d} = \sum_{\mathbf{k}, \sigma} \epsilon(\mathbf{k}) \hat{c}_{\mathbf{k}, \sigma}^\dagger \hat{c}_{\mathbf{k}, \sigma} - \frac{J}{2} \sum_{\substack{\mathbf{k} \mathbf{k}' \\ \sigma \sigma'}} (\mathbf{S} \cdot \boldsymbol{\tau}_{\sigma \sigma'}) \hat{c}_{\mathbf{k}, \sigma}^\dagger \hat{c}_{\mathbf{k}', \sigma'}$$

Гамильтониан s-d обмена.  $\mathbf{S}$  — оператор локализованного момента,  $\boldsymbol{\tau}$  — вектор матриц Паули

2) Режим переменной валентности - стартуя с кондовского предела уменьшаем расстояние между  $E_d$  и  $E_d + U$

3,4) Два немагнитных режима - оба состояния выше и ниже уровня Ферми



# МОДЕЛЬ АНДЕРСОНА

---

Спасибо за внимание!